

LA COUVERTURE PEDOLOGIQUE : INTERACTIONS AVEC LES ROCHES, LE MODELE ET LES FORMES DE DEGRADATION SUPERFICIELLES

Emmanuel Fritsch⁽¹⁾, *Christian Valentin*⁽²⁾, *Bernard Morel*⁽³⁾ et *Pierre Leblond*⁽³⁾

- (1) ORSTOM, Antenne auprès du Centre de Pédologie Biologique, 17, rue Notre Dame des Pauvres, BP 5, 54501 Vandoeuvre les Nancy.
- (2) ORSTOM, 70 route d'Aulnay, 93140 Bondy Cedex.
- (3) Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics de Yamoussoukro, Côte d'Ivoire.

RESUME

La caractérisation minéralogique et structurale de la couverture pédologique a révélé la présence de deux grands domaines d'altération et de pédogenèse (domaine ferrallitique, domaine ferrugineux et hydromorphe) et de cinq systèmes (systèmes sol rouge, système cuirassé, système de dégradation superficielle, système hydromorphe, système colluvio-alluvial). L'étude des interactions avec les autres composantes du milieu physique fait apparaître l'influence de la lithologie sur le développement vertical et latéral des systèmes. Elle révèle l'existence de deux types d'érosion (érosion interne, érosion mécanique superficielle) qui se relayent et façonnent les différentes facettes du modelé. Enfin, elle établit un rapprochement entre deux formes de dégradation affectant la partie supérieure de la couverture pédologique (micro-organisations pelliculaire superficielles, système de dégradation superficielle).

INTRODUCTION

L'unité hydro-pédologique présentée dans cet article (bassin versant de Booro-Borotou) est caractéristique d'un paysage cuirassé développé sur formations gneisso-migmatitiques d'une savane préforestière du domaine subsoudanais. Après une brève caractérisation des grands ensembles de la couverture pédologique, nous établirons les principales interactions entre les composantes du milieu physique (végétation exclue).

CADRE ET METHODES D'ETUDE

La géologie

Le secteur étudié appartient aux formations gneisso-migmatitiques du socle libérien du domaine guinéen (datées à 1929 + ou - 45 MA ; d'après Bonhomme - 1962 - cet âge correspondant à un rajeunissement dû à l'orogénèse éburnéenne). Sur le bassin versant, trois types de roches ont été distingués (carte géologique, fig. 1) : gneiss migmatitique à biotite, gneiss migmatitique à hypersthène et pyroxéno-amphibolite.

Le gneiss migmatitique à biotite couvre la rive droite et amont du bassin. Il s'agit d'une roche leucocrate à grains moyens. Son litage est souvent net : alternance de lits quartzeux blanc grisâtre, de lits feldspathiques (microcline, perthite, oligoclase) blanc rosé et plus épisodiquement de passées ferromagnésiennes (biotite verte, hornblende verte). Le gneiss migmatitique à hypersthène occupe la majeure partie du bassin (75 %). Il s'agit d'une roche mésocrate (gris clair à gris foncé) à grains moyens, constituée à 80 % de quartz et d'oligoclase. Par rapport au précédent gneiss, celui-ci a un litage plus frustré et des passées ferromagnésiennes (hypersthène, hornblende verte, biotite brune) localement plus nombreuses et plus épaisses. Les pyroxéno-amphibolites s'observent sous forme d'enclaves de dimensions très variables dans les gneiss, présentant le plus souvent un contact franc avec l'encaissant. Cette roche plus difficilement altérable s'observe à l'affleurement sous forme de boules (chaos rocheux). Elle appartient aux roches mélanocrates à grains fins, à texture grenue homogène. Elle est très riche en ferromagnésiens (augite, hypersthène, hornblende verte) et contient des proportions variables de plagioclases (andésine-labrador).

Les enclaves de pyroxéno-amphibolite sont en général discordantes sur le litage des gneiss (en réalité, la discordance est d'autant plus nette que la taille de l'enclave est plus grande). Cette discordance, et localement la tendance à l'assimilation dans l'encaissant, tendent à montrer que ces enclaves sont des reliques d'une ancienne formation. Ainsi, les pyroxéno-amphibolites mais aussi les quartzites (présentes dans la région) auraient précédé la mise en place des gneiss migmatitiques.

Dans un rayon d'action d'environ 2 km à partir du centre du bassin versant, les directions structurales des roches visibles à l'affleurement ont été mesurées. Les résultats présentés dans la figure 2b révèlent deux grandes directions : la première (60°) correspond à la direction du plan de schistosité des gneiss, la seconde (130°) à celle des plans de fissuration, de diaclases et à celle de filons. Lorsqu'on accroît ce rayon d'action (plus grand nombre de mesures et meilleure précision si les directions changent peu) à 8 km, ces directions restent sensiblement les mêmes (direction de filons exceptée : fig. 2a).

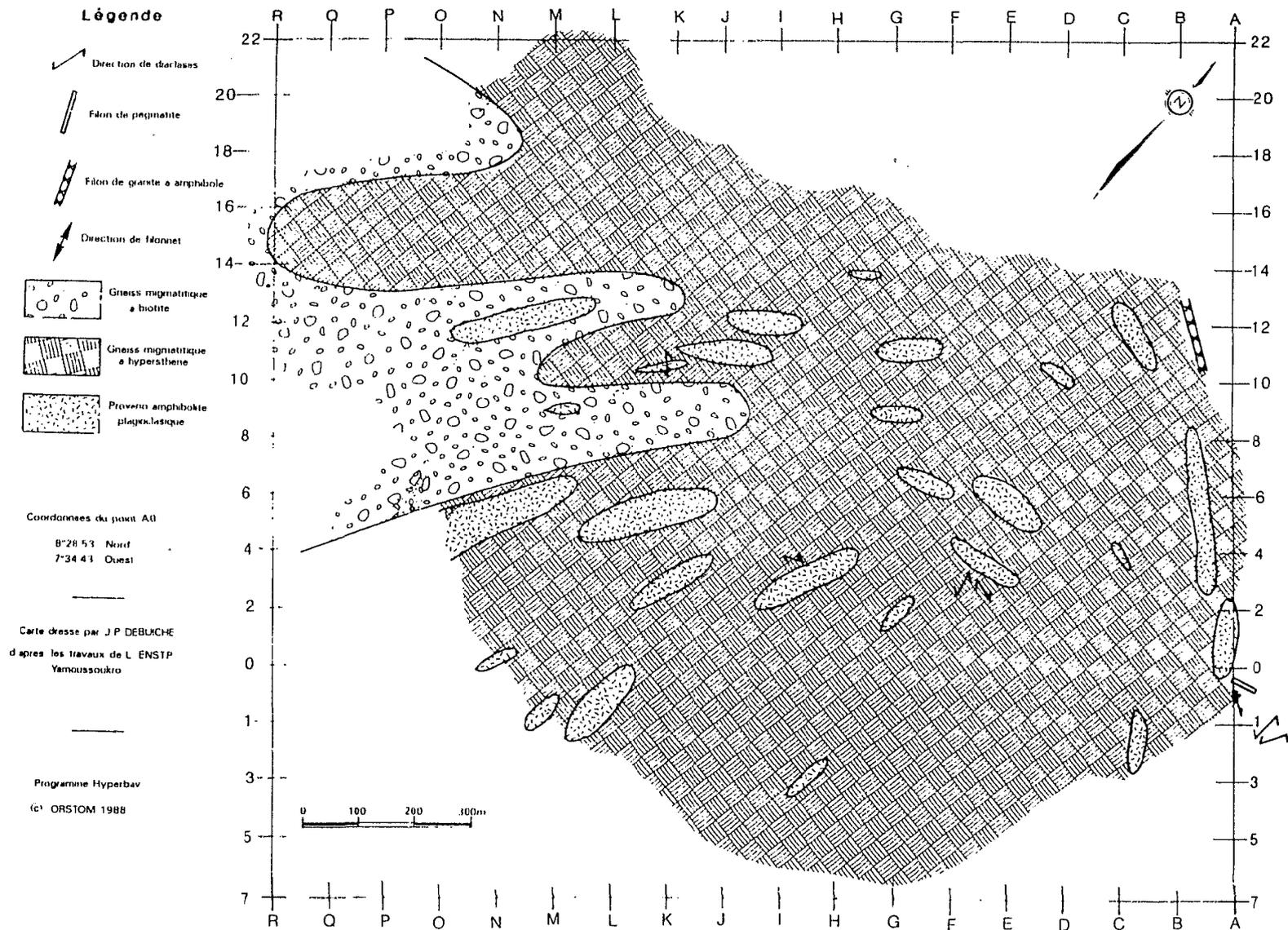


Figure 1. Esquisse géologique

La géomorphologie

La morphologie du paysage est celle d'une pénéplaine dominée par quelques reliefs résiduels, nombreux à l'amont du bassin de la FéréDougouba en Guinée (altitude maximale à la frontière : 900 m). Ces reliefs sont constitués d'inselbergs gneissiques, de collines formées de quartzites et de pyroxéno-amphibolites et de buttes bauxitiques et cuirassées. Raccordés à la pénéplaine par une courte pente concave, ils appartiennent au haut relief de commandement de la dorsale guinéenne.

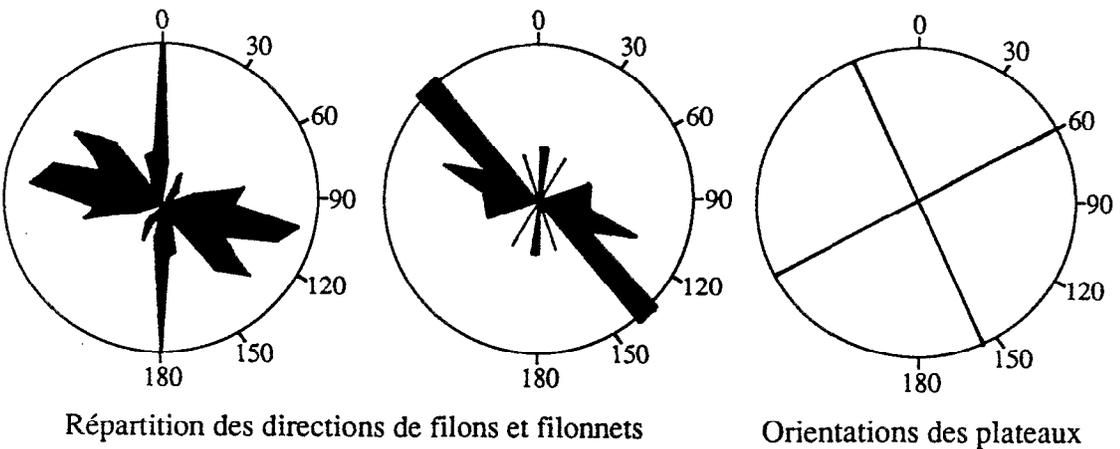
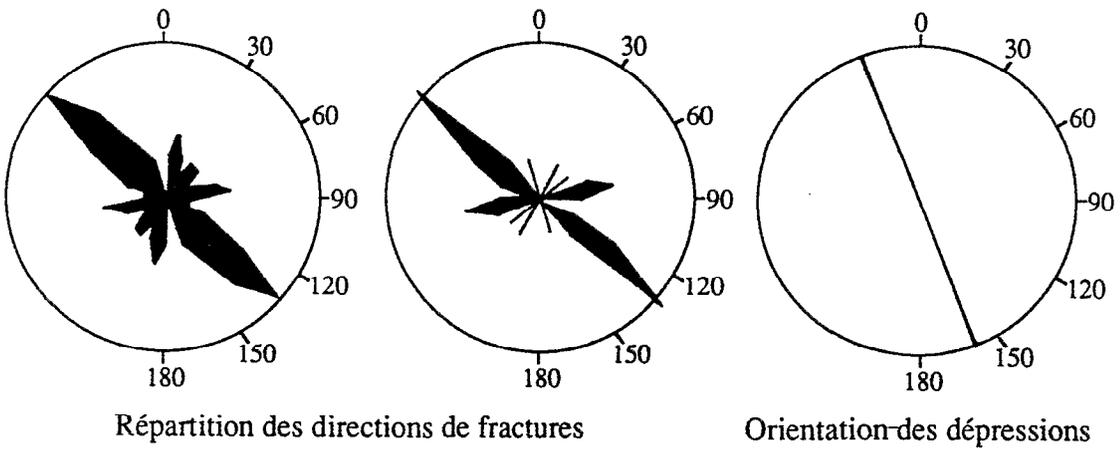
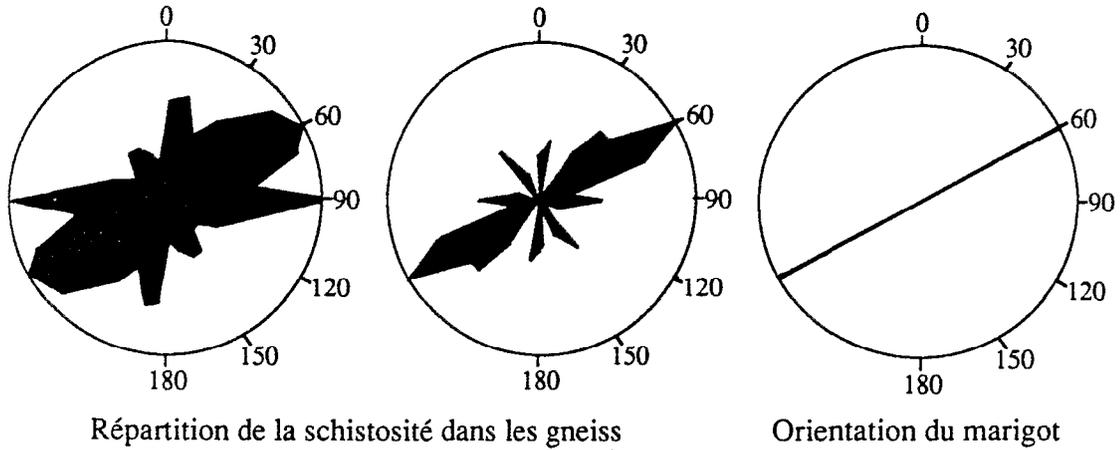
La pénéplaine, d'aspect monotone, domine le paysage. Les sommets tabulaires de la pénéplaine culminent à environ 470 m d'altitude et délimitent une surface plane apparentée au haut glacis (Eschenbrenner, 1969, 1978 ; Eschenbrenner et Grandin, 1970). Ces sommets sont cuirassés. Nombreux et de grande taille à proximité du haut relief de commandement (au nord-ouest), ils deviennent plus dispersés et de plus petite taille à proximité des grands axes de drainage (au sud-est). Ils constituent un repère morphologique majeur pour la région et sont séparés du reste du versant par un ressaut ou talus à déclivité plus ou moins forte (2 à 40 ‰). Le deuxième repère de la pénéplaine s'observe à la mi-versant et correspond à une légère rupture de pente. Il permet d'opposer un haut de versant (ou moyen glacis) à pente faible (2 ‰) et rectiligne (lorsqu'il est raccordé au haut glacis) d'un bas de versant (ou bas glacis) convexo-concave, plus pentu à l'amont. Le troisième repère, localisé en moyenne à 45 m en dessous du premier, correspond au réseau hydrographique. Ce réseau a souvent un tracé rectiligne, des changements brutaux d'orientation et des zones de confluence à angles droits qui sont autant d'indices de zones de fracturation ou de plissement du socle. Enfin, dans une direction sensiblement orthogonale à l'axe des marigots se développent des thalwegs secondaires qui sont raccordées à la rupture de pente de mi-versant par une courte pente concave.

A l'échelle du bassin versant, les quatre reliques de plateau cuirassé, souvent démantelées à leur périphérie, n'occupent que 5 ‰ de sa superficie. Les principaux éléments du paysage (plateaux, thalwegs secondaires et bas fond) sont allongés et alignés dans deux directions sensiblement orthogonales entre elles (fig. 2c). la première (60°) concorde avec la direction de répartition du plan de schistosité des gneiss, la seconde (160°) avec la répartition des directions de fractures et de diaclases.

Méthodes

La caractérisation de la couverture pédologique s'est appuyée essentiellement sur l'observation de 130 fosses ouvertes le long de neuf toposéquences disposées en épi par rapport à l'axe du marigot (fig. 3). Les fosses ont été implantées en fonction des observations qui y ont été faites progressivement, selon la méthode préconisée par Boulet et al. (1982). La profondeur des fosses dépend de celle du toit de l'altérite que nous avons dépassé de façon systématique. Elle oscille entre 2 et 8 mètres. Dans certaines de ces fosses, le socle a été atteint. Cette prospection préliminaire a permis :

- d'établir l'inventaire des principales organisations pédologiques du bassin,
- de localiser ces organisations sur des représentations en coupe (toposéquence), de façon à visualiser leur extension et leur distribution relative dans deux directions de l'espace (verticalement et latéralement suivant un axe de plus forte pente),
- de prélever des échantillons de sol en place ou remaniés, destinés aux observations micro et ultra-microscopiques et aux analyses (physiques et chimiques, RX, IR...).



STRUCTURES LITHOLOGIQUES dans un rayon
a) de 8 Km **b) de 2 Km**

c) ORIENTATIONS DES ÉLÉMENTS DU PAYSAGE

Figure 2. Les principales directions structurales.

Cette étape préliminaire fut décisive pour la caractérisation pédologique du site d'étude. Elle a montré la grande représentativité des organisations inventoriées. En effet, d'une toposéquence à l'autre, nous constatons non seulement les mêmes types d'organisations, mais aussi de distribution de ces organisations les unes par rapport aux autres. Ceci nous autorise à ne retenir qu'une toposéquence (3D), la plus représentative, pour les présenter. En revanche, d'une toposéquence à l'autre, les seules variations importantes ont trait à la plus ou moins grande extension spatiale de chacune de ces organisations et ce, le plus souvent, en relation avec la topographie de la surface du sol.

La seconde étape a été d'établir, à partir des coupes, les relations structurales entre ces différentes organisations. Rappelons (Fritsch *et al.*, 1986a) qu'à l'échelle des toposéquences, les mégastructures sont définies par les courbes enveloppes de chacune de ces organisations. Les relations structurales sont de deux types. Il s'agit soit de relations de concordance, soit de discordance (fig. 4). Dans le premier cas, les organisations (mais aussi les mégastructures qui leur sont apparentées) sont emboîtées les unes dans les autres. Cet emboîtement structural nous a amenés à regrouper ces organisations au sein de grands ensembles pédologiques que nous avons dénommés systèmes. Dans le second cas, la discordance permet d'isoler et de circonscrire les différents systèmes inventoriés. Enfin, les systèmes ont été regroupés au sein de grands domaines pédologiques qui ont eux mêmes une réalité dans leur distribution toposéquentielle mais aussi latitudinale à l'échelle de l'Afrique de l'ouest.

LES ORGANISATIONS PEDOLOGIQUES INTERNES

Les grands traits de la couverture pédologique

L'analyse structurale a permis de distinguer au sein de la couverture pédologique deux grands domaines (fig. 5) : un domaine ferrallitique amont et un domaine ferrugineux et hydromorphe aval. Par ailleurs, certaines données minéralogiques (Fritsch *et al.*, 1989) ont révélé des états d'altération différents entre la partie amont et aval des versants. Ainsi, sur des critères minéralogiques et non plus structuraux, nous pouvons aussi différencier :

- un domaine ferrallitique amont fortement altéré et plus enrichi en kaolinite (milieu ouvert et drainant),
- un domaine ferrugineux et hydromorphe aval plus faiblement altéré et, à l'inverse, plus riche en minéraux primaires résiduels (milieu confiné).

Le domaine ferrallitique regroupe les quatre plateaux cuirassés et leurs rebords, soit environ 20 % de la superficie du bassin. Le domaine ferrugineux et hydromorphe occupe le reste du modelé, soit la majeure partie des versants et le bas fond. Il peut lui même être dissocié en quatre systèmes (fig. 5) qui ont une distribution horizontale dans le versant. Du haut vers le bas, il s'agit :

- du système de dégradation superficielle. Ce système marque le passage des sols rouges aux sols ocres, jaunes puis blancs. Il occupe la majeure partie du versant et n'affecte que la partie meuble supérieure de la couverture pédologique (en moyenne sur un mètre),
- du système superficiel d'apport colluvio-alluvial. Ce système, présent dès la surface du sol, occupe localement la partie aval des versants,

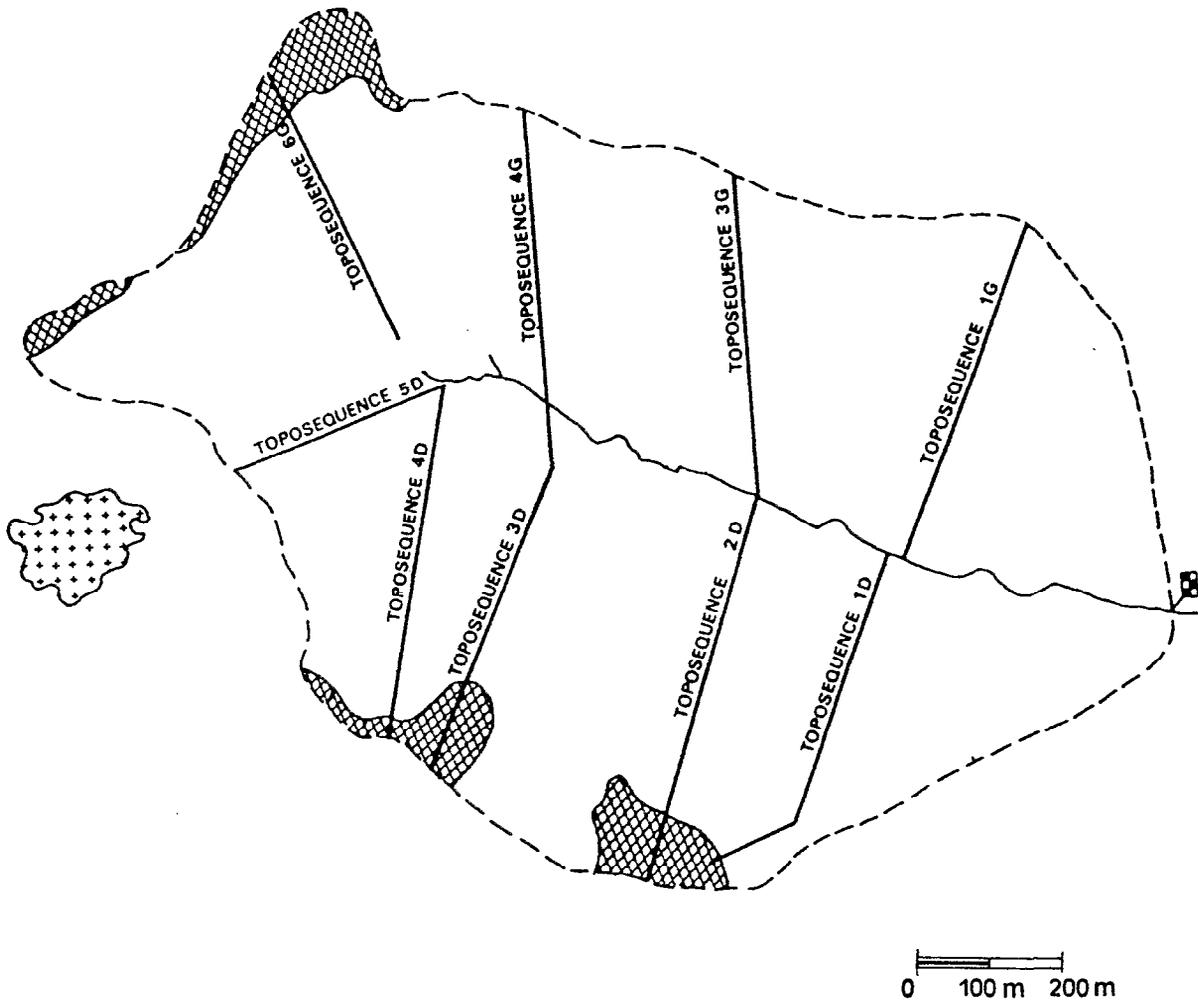


Figure 3. Localisation des toposéquences dans le bassin.

DEUX GRANDS TYPES DE RELATIONS : ① CONCORDANCE, ② DISCORDANCE

UN EXEMPLE : LE BASSIN VERSANT DE BOORO BOROTOU

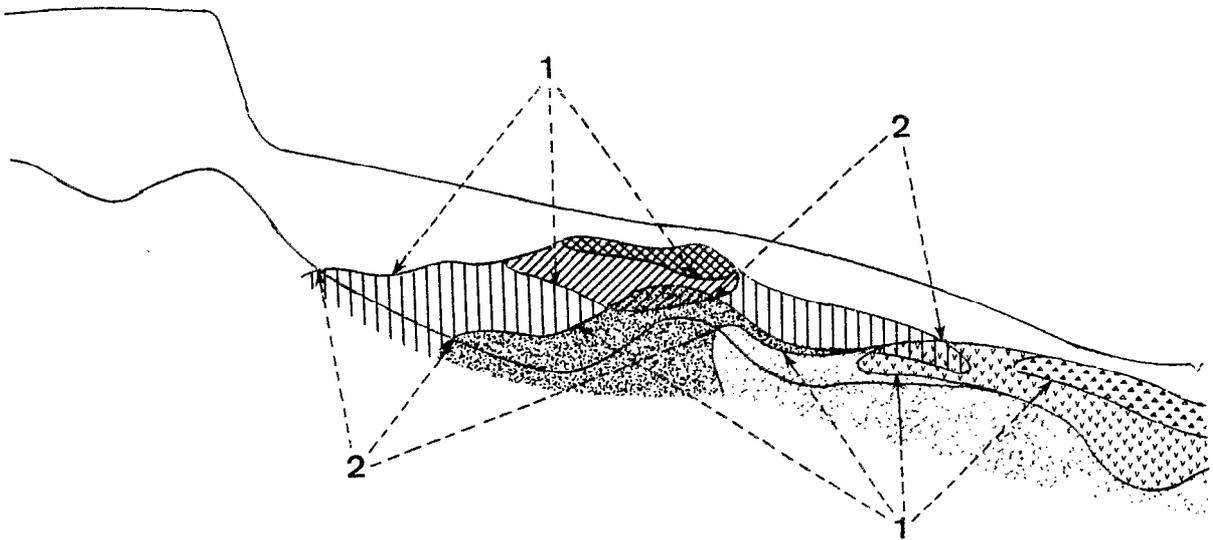


Figure 4. Analyse des relations structurales à l'échelle des versants.

LE DOMAINE FERRALLITIQUE

-  Le système sol rouge
-  Le système cuirassé de plateau

LE DOMAINE FERRUGINEUX ET HYDROMORPHE

-  Le système de dégradation superficiel
-  Le système cuirassé de versant
-  Le système hydromorphe
-  Le système alluvial

-  Ensemble gravillonnaire
-  Toit de l'altérite

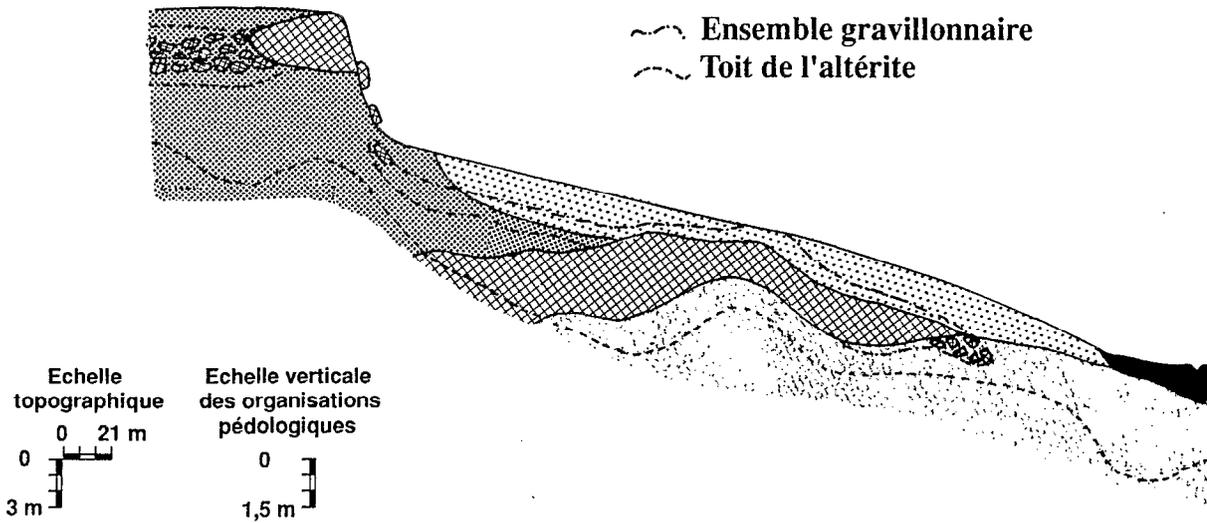


Figure 5. Les grands ensembles de la couverture pédologique.

- du système cuirassé. Il présente une distribution radiale par rapport à la mi-versant et affleure généralement à ce niveau,
- du système hydromorphe. Ce dernier système a une distribution radiale par rapport à l'axe du marigot. Il s'épaissit nettement vers l'aval et devient affleurant en bas de versant.

Le domaine ferrallitique

Les horizons du domaine ferrallitique (fig. 6) apparaissent sensiblement parallèles à la surface topographique. Cette distribution est spécifique d'une différenciation à composante verticale dominante. Ce domaine comprend un système cuirassé sur les plateaux, plus ou moins encaissé dans un système sol rouge (sur les plateaux et sur leur rebord : talus et haut de versant).

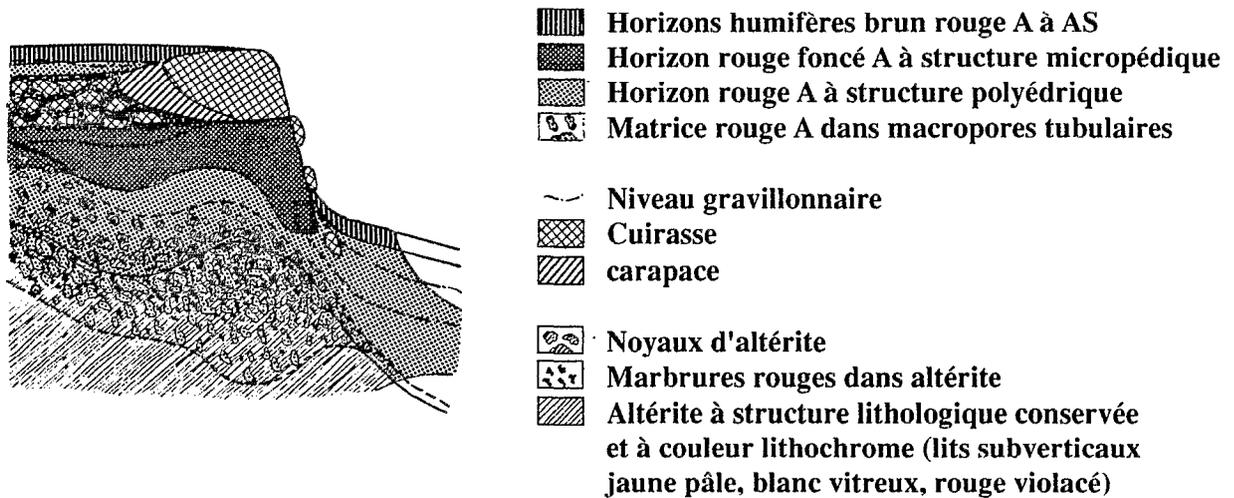
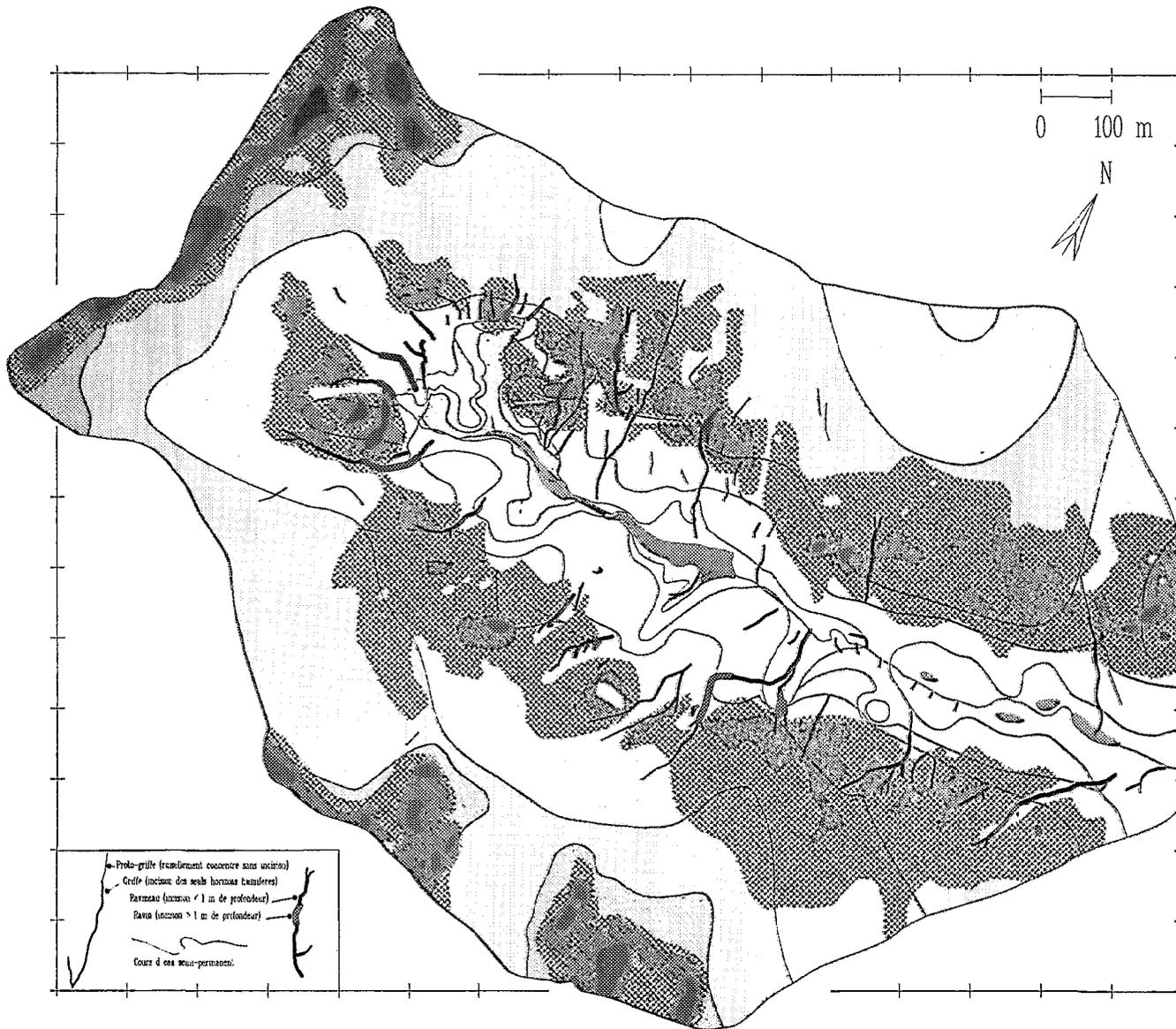


Figure 6. *Les altérations et les différenciations des sols du domaine ferrallitique.*

Le système cuirassé, d'une épaisseur de 2 m en moyenne, affleure localement sur les plateaux (bowé). Les zones d'affleurement sont alignées suivant deux directions, orthogonales entre elles. Ces dernières correspondent à la fois aux axes d'allongement des plateaux et aux grandes directions structurales régionales.

Latéralement, ce système comprend deux types d'organisation : une carapace et une cuirasse, la seconde étant le plus souvent affleurante. De la carapace vers la cuirasse, nous constatons un accroissement de l'induration et l'accentuation de la coloration rouge (réticules rouge foncé pour la première, rouge foncé à plages noires et à cortex brun noir autour des macropores pour la seconde). D'autre part, le système présente un faciès altéritique (réticules ou plages jaune pâle, plus rarement rouge violacé) d'autant plus net que l'induration est moins poussée. Enfin, ce système coiffe localement le manteau d'altération. Ces observations tendent à montrer que l'induration s'est faite au détriment de matériaux altéritiques suffisamment proches de la surface topographique. L'accumulation du fer (surtout sous forme d'hématite) tend progressivement à effacer les textures lithologiques mais conserve néanmoins certaines structures lithologiques (observation de réseaux de diaclases dans certaines cuirasses). Toutefois la tendance actuelle ne serait pas en faveur d'une extension du système cuirassé, mais bien plus, à sa dégradation, ce qui permettrait d'alimenter en hématite le système sol rouge. Deux arguments tendraient à confirmer cette hypothèse : la présence entre le niveau induré et l'altérite d'horizons rouges argileux parfois très épais, la présence d'horizons gravillonnaires et de matrices meubles rouges à la périphérie du système cuirassé.

Sur les plateaux, le système sol rouge a une épaisseur très variable à la fois au-dessus (de 0 à 2 m) et en dessous du système cuirassé (0 à 3 m). Sous ce dernier et lorsqu'il est le plus épais, nous constatons la superposition de trois grands types d'horizons (du bas vers le haut) :



Sols ferrallitiques :

-  sols de plateau et de flanc de cuirasse
-  sols rouges

Sols ferrugineux :

-  sols ocres
-  sols jaunes

Sols hydromorphes :

-  sableux
-  sableux a depot colluvio-alluvial peu epais
-  colluvio-alluviaux argileux
-  sableux avec lentilles d'argile en profondeur

apparition d'une cuirasse :

-  a moins de 15 cm
-  entre 15 et 60 cm
-  a plus de 60 cm

les sols

- une altérite totalement kaolinisée dans laquelle la foliation subverticale des gneiss est conservée (bancs jaune pâle à blancs, dominants, correspondant aux anciennes passées quartzo-plagioclasiques du gneiss, veines rouge violacé situant les anciennes passées ferromagnésiennes du gneiss),
- une zone de transition très épaisse (4 m en moyenne) comprenant deux types d'horizon. Le premier est une altérite identique à la précédente dans laquelle nous constatons l'apparition et le développement (de bas en haut) de macropores tubulaires (souvent comblés par des microagrégats rouges argileux d'origine termitique : *Macrotermes*) et, dans la matrice altéritique, de plages de plus en plus rouges et nombreuses qui finissent par présenter une légère induration. Le deuxième type d'horizon est rouge argileux à nombreux noyaux altéritiques vers le bas, devenant plus petits et moins abondants vers le haut,
- des horizons rouges argileux à structure polyédrique nette, localement à sous-structure micropédique d'autant plus nette et plus développée que la coloration rouge (2,5YR) est plus soutenue (accroissement des teneurs en hématite).

Sur les plateaux et au-dessus du système cuirassé, seuls les horizons rouges argileux sont présents. Ils sont colorés par la matière organique sur les 35 premiers centimètres et généralement dépourvus, à ce niveau, d'une structure micropédique.

Sur les talus et en haut de versant et par rapport aux plateaux, nous constatons les trois variations suivantes :

- disparition du système cuirassé, celui-ci étant relayé latéralement par un horizon gravillonnaire contenant (surtout sur le talus) de très gros blocs de cuirasse ;
- disparition des horizons rouges argileux fortement microagrégés ;
- passage beaucoup plus brutal entre l'altérite et les horizons rouges argileux à structure polyédrique.

Le domaine ferrugineux et hydromorphe

Les organisations du domaine ferrugineux et hydromorphe sont, nous l'avons vu, apparentées à quatre systèmes pédologiques. Dans ce domaine, les gradients de différenciation sont à la fois verticaux mais aussi et surtout latéraux. Ceci nous amènera à privilégier cette dernière composante pour la présentation des organisations de chacun de ces systèmes.

Système de dégradation superficielle

Ce système, ouvert à la surface, a globalement une forme en lame radiale à l'axe du marigot (fig. 7). A l'amont, il est encaissé dans les horizons rouges du domaine ferrallitique et recoupe la limite supérieure (parfois aussi inférieure) de l'horizon glébulaire. La limite supérieure de cet horizon, sensiblement parallèle à la surface topographique, une fois recoupée par le système, se maintient dans ce dernier. Cet encaissement et cette discordance montrent que le développement de ce système s'est fait sur place au détriment des horizons rouges ferrallitiques à l'amont.

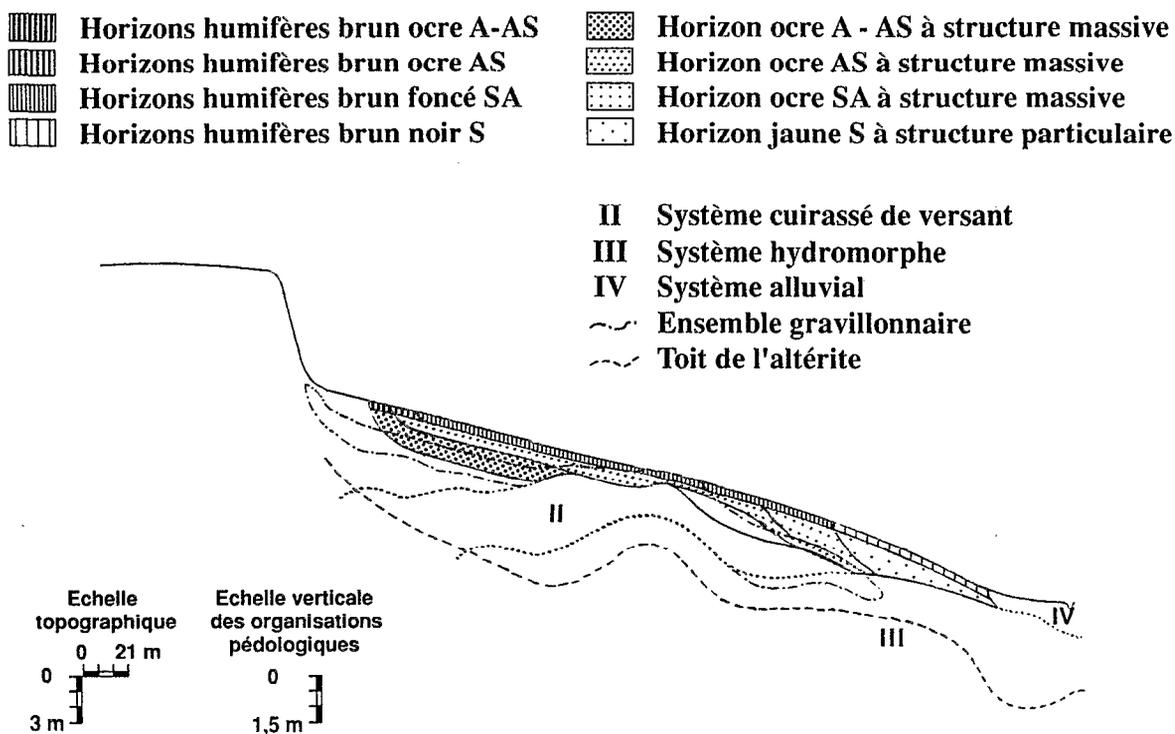
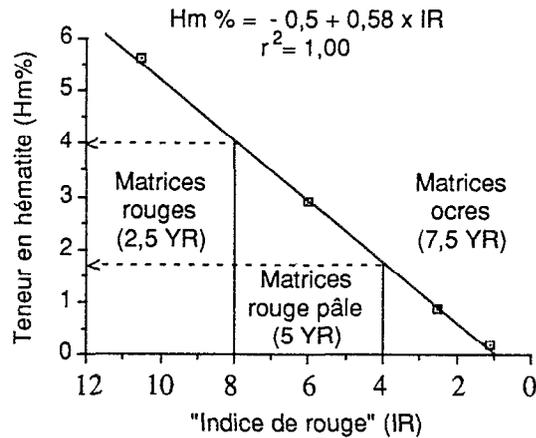


Figure 7. Les différenciations du système de dégradation superficielle.

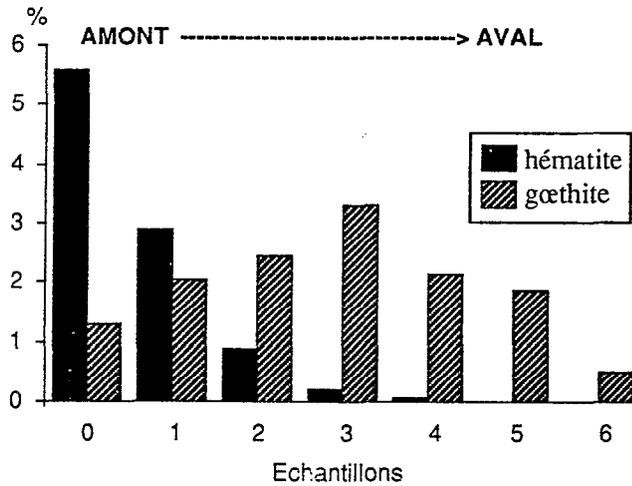
D'autre part, la discordance montre également que le système est au moins postérieur à la mise en place du niveau gravillonnaire et qu'il affecte surtout les matrices meubles. A l'aval des versants, le système disparaît en biseau. Il est rejoint et recoupé par le système hydromorphe qui devient affleurant.

Le système comprend une succession ordonnée de quatre couples d'horizons (humifères et minéraux) emboîtés l'un dans l'autre (fig. 7). Cet emboîtement d'horizons et l'encaissant amont (horizons humifères et minéraux du domaine ferrallitique) retracent les principales étapes des évolutions minéralogiques et structurales apparentées au système. Sur le terrain, ces évolutions sont révélées par des modifications de couleur, de texture (granulométrie) et de structure (agrégation, porosité).

Du bas vers le haut et surtout de l'amont vers l'aval des versants, les variations colorimétriques vont dans le sens d'une baisse du pouvoir de pigmentation rouge, révélant progressivement une coloration jaune qui tend elle-même à disparaître (horizon jaune pâle à blanc). D'un point de vue minéralogique, ces variations sont à la fois le reflet d'une baisse globale des teneurs en oxy-hydroxydes de fer (hématite, goéthite), d'une diminution des teneurs en hématite et d'un accroissement puis d'une diminution des teneurs en goéthite (fig. 8).



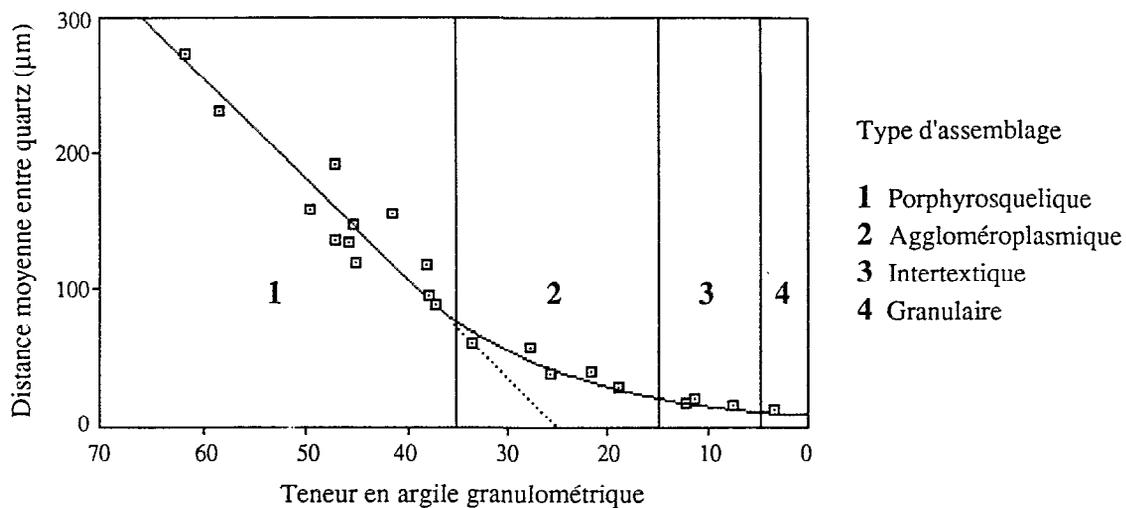
a) VARIATIONS COLORIMÉTRIQUES



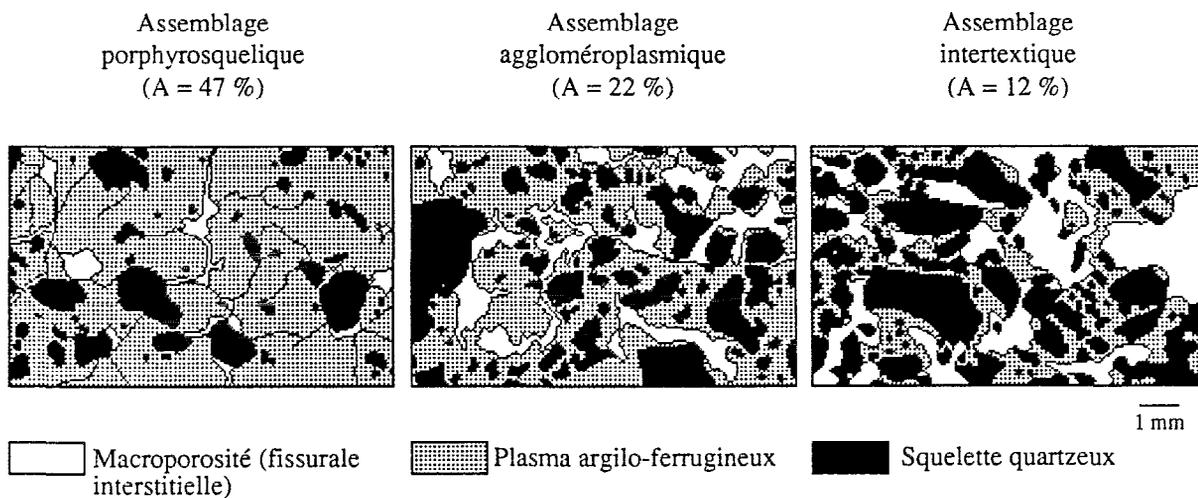
b) VARIATIONS MINÉRALOGIQUES

Figure 8. Variations colorimétriques et minéralogiques sur le versant de l'amont vers l'aval.

Les variations granulométriques traduisent une baisse de teneur en éléments fins (kaolinite, oxy-hydroxydes de fer) entraînant un accroissement de la teneur en éléments grossiers (essentiellement quartzeux). Sur des échantillons de sol en place (lames minces), ces variations entraînent à la fois un rapprochement des quartz et une modification du type d'assemblage entre éléments fins et grossiers (fig. 9). Les structures agrégatives évoluent du pôle fragmentaire vers le pôle massif puis vers le pôle particulaire (fig. 10).



a) RELATION ENTRE TENEUR EN ARGILE ET DISTANCE INTER-QUARTZ



b) RELATION ENTRE TENEUR EN ARGILE ET MODE D'ASSEMBLAGE

Figure 9. Variations texturales sur le versant : de l'amont vers l'aval.

La caractérisation détaillée du système (Fritsch *et al.*, 1989) a montré que les variations colorimétriques et granulométriques contrôlent les variations structurales et que les deux premières peuvent apparaître nettement décalées à l'amont du système. Ceci nous a amenés à distinguer deux étapes dans l'évolution structurale du système. Dans la première étape, l'évolution structurale, contrôlée par la baisse de la teneur en hématite, est importante lorsque cette dernière devient inférieure à 2 % (passage des horizons rouges 5YR aux horizons ocres 7,5YR). Elle peut se faire sans variation de la teneur en argile granulométrique et marque le passage des structures fragmentaires (micropédique et polyédrique) aux structures massives. Elle entraîne à la fois la disparition de la porosité interagrégats et une légère diminution de la porosité totale du sol (Iris, 1986). Dans la deuxième étape, l'évolution structurale est contrôlée par la baisse de la teneur en argile granulométrique. Quelle que soit la teneur en hématite et en goéthite, elle entraîne l'apparition (pour des teneurs en argile inférieures à 35 %) puis le développement d'une porosité interstitielle qui modifie le type d'assemblage entre constituants fins et grossiers du sol.

Ainsi, les évolutions texturales et structurales modifient à la fois la géométrie de l'espace poral et les proportions relatives des différents types de porosité. Elles seront, elles-mêmes, susceptibles de modifier le comportement hydrique du sol.

Système cuirassé

Ce système a une forme de chapeau de gendarme ou de coiffe (fig. 11). Il est présent de part et d'autre de la rupture de pente de mi-versant et devient, le plus souvent, affleurant à subaffleurant à ce niveau. A l'amont, il se forme au détriment des horizons rouges et de la partie supérieure des altérites du domaine ferrallitique. Il recoupe de ce fait la transition sol-altérite. A l'aval des versants, le système se termine en biseau. Comme pour le système de dégradation superficielle, sa disparition résulte d'un rapprochement vers la surface et vers l'aval du système hydromorphe.

De l'amont vers l'aval des versants, une succession ordonnée de cinq types d'organisations a été différenciée (fig. 11). Les deux premiers marquent l'apparition d'un bariolage qui devient de plus en plus contrasté. Il y a à la fois apparition de plages centimétriques qui deviennent de plus en plus rouges et de plus grande taille et un éclaircissement des matrices entre ces plages (rouge pâle puis ocre). Le troisième type d'organisation marque un net accroissement du nombre de ces plages qui deviennent coalescentes vers l'aval (réticules) et le début d'une légère induration. Les deux derniers traduisent un accroissement de l'induration, elle-même corrélée à l'accentuation de la coloration rouge des réticules (rouge foncé pour la carapace, rouge foncé à plages noires et à cortex brun noir autour des macropores pour la cuirasse). Ces réticules occupent alors plus de 80 % du volume du matériau.

Les données analytiques montrent que les deux premiers types d'organisations sont le siège d'une redistribution sur place du fer. Cette redistribution du fer se fait sur courte distance, des matrices meubles éclaircies vers les plages rouges. En revanche, les deux derniers types d'organisations (carapace, cuirasse) traduisent un accroissement des teneurs en fer (partie additive du système) qui augmente la densité du matériau et tend progressivement à l'imperméabiliser.

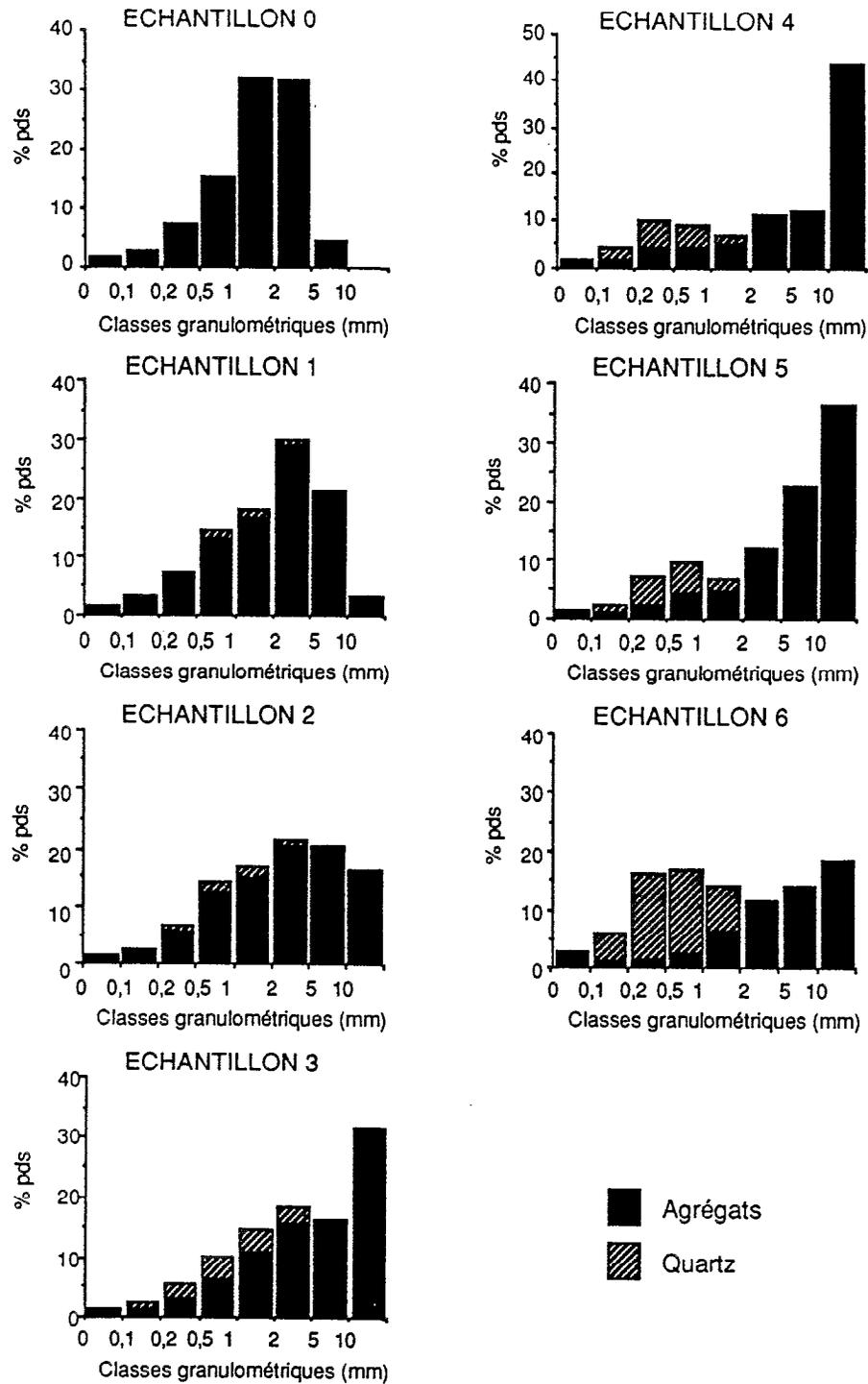


Figure 10. Variations structurales sur le versant : de l'amont vers l'aval (0 à 6).

Au sein du système, le cuirassement se reproduit généralement à deux endroits (fig. 11). Le premier niveau cuirassé s'observe de part et d'autre de la rupture de pente de mi-versant. Il a une couleur dominante rouge foncé à noir et présente souvent un faciès altéritique net sous forme de réticules puis (vers la surface) de plages (de plus en plus petites) jaune pâle, plus rarement rouge violacé. Cet aspect est sensiblement identique à celui observé sur les plateaux dans les niveaux indurés (carapace, cuirasse). Au niveau de la mi-versant et sur des coupes, nous constatons à la fois une remontée du manteau d'altération et celle de la cuirasse qui devient affleurante à sub-affleurante. La cuirasse coiffe ainsi le manteau d'altération. A l'échelle du bassin, ce niveau d'induration constitue une véritable ceinture facilement délimitable en surface par la rupture de pente de mi-versant et/ou par les affleurements cuirassés et gravillonnaires. Dans la mesure où cette ceinture marque à la fois une remontée du manteau d'altération (aussi du socle d'après les mesures géophysiques) et l'imperméabilisation de sa partie supérieure (accumulation relative et absolue de fer), il est fort probable qu'elle limite les échanges hydriques entre la partie amont et aval des versants.

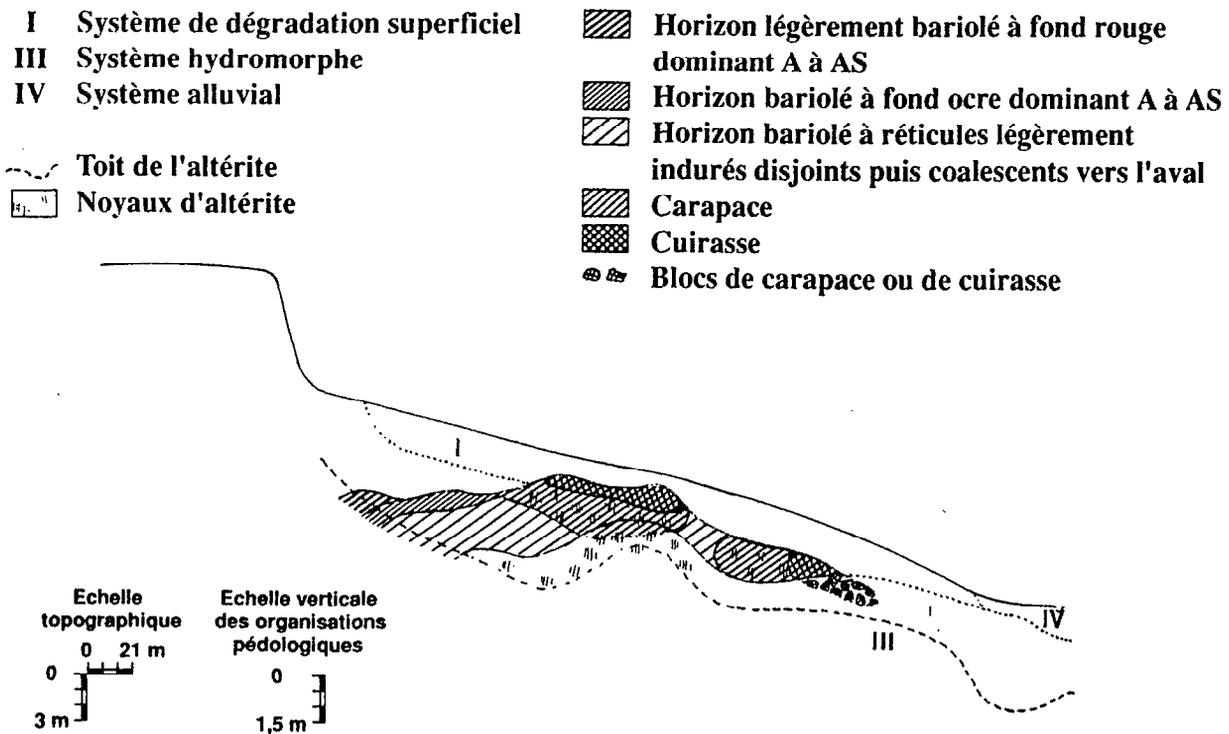
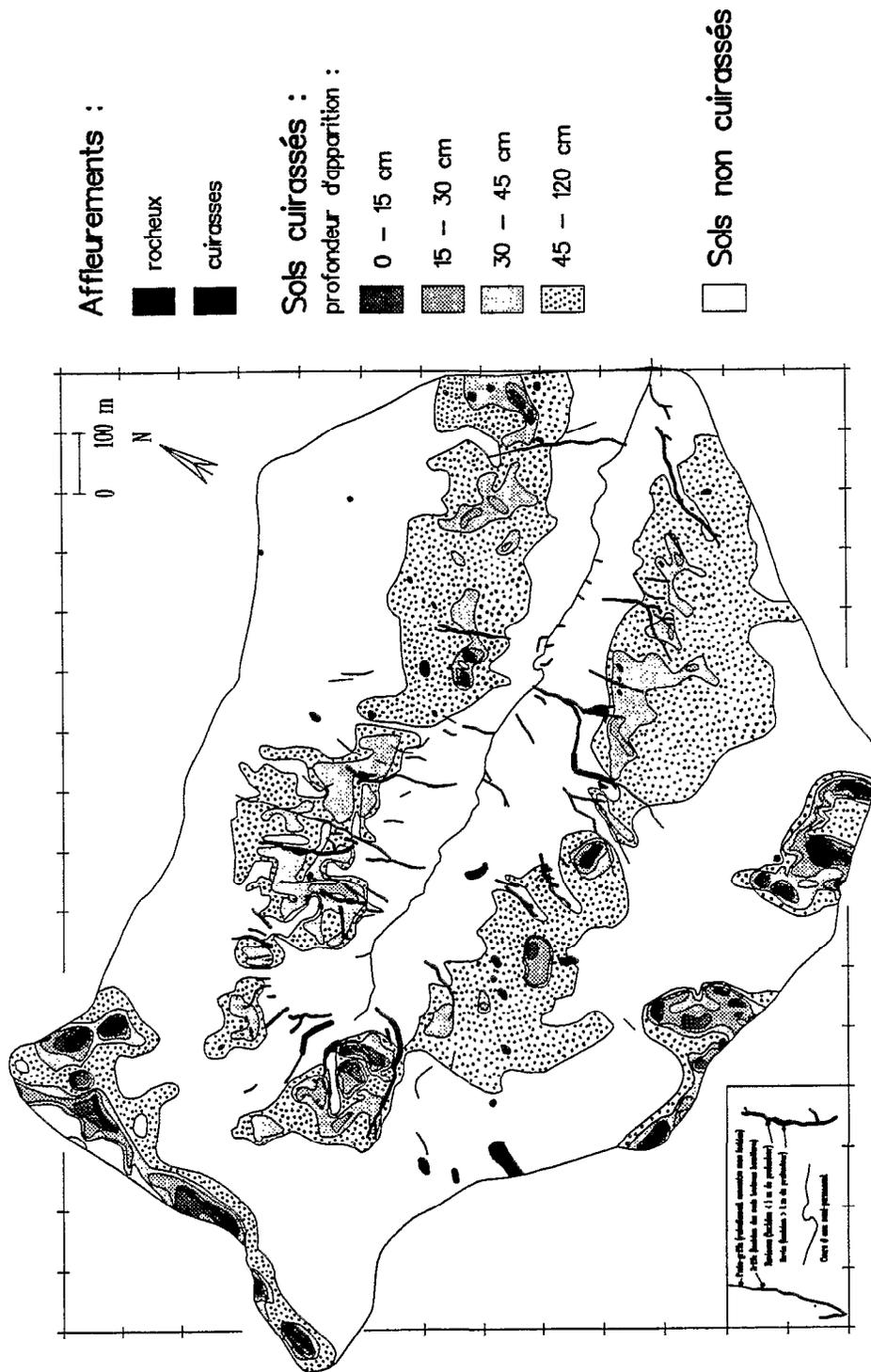


Figure 11. Les différenciations du système cuirassé de versant.



Logiciel ARC/INFO, INRA, CNRS

Figure 12 : Carte des indurations

Néanmoins sur document cartographique (fig. 12), cette induration apparaît latéralement en discontinue. Localement, il y a régression du système cuirassé et, à l'inverse, un plus grand développement du système hydromorphe vers l'amont (pénétration en forme de couloir) dans des zones où l'altérite et le socle sont situés à plus grande profondeur. Le deuxième niveau cuirassé est localisé plus à l'aval en profondeur. Il présente un faciès très différent du précédent. Sa couleur jaune ocre à brun foncé (nette prédominance de la goethite par rapport à l'hématite) s'affirme et se généralise vers l'aval. De même, il acquiert progressivement un faciès pisolitique (petites concrétions inférieures au cm). Ces pisolites envahissent l'ensemble de la cuirasse à l'aval.

Enfin, le système cuirassé se démantèle à la fois dans sa partie supérieure (notamment lorsqu'il est affleurant à sub-affleurant), mais aussi en profondeur et vers l'aval, sous l'action remontante du système hydromorphe. Ce démantèlement nourrit sur place de nouvelles séquences d'évolutions gravillonnaires (blocs de cuirasse, de carapace, nodules tortueux, concrétions à quartz hérissés).

Système hydromorphe

Le système a une forme en langue caractéristique et une distribution radiale par rapport à l'axe du marigot (fig. 13). Il se forme au détriment des différenciations des deux précédents systèmes et du manteau d'altération. Il recoupe à l'amont la transition sol-altérite et à l'aval la base du niveau cuirassé jaune ocre à faciès pisolitique. Ce dernier libère dans le système hydromorphe de gros blocs de cuirasse plus ou moins jointifs qui deviennent plus petits et moins nombreux vers l'aval.

Ce système présente cinq séries de différenciations (fig. 13). Celles-ci sont emboîtées les unes dans les autres et reproduisent, chacune, la structure en langue du système. Dans les deux premières, la différenciation verticale et latérale se fait sans variation de la teneur en argile minéralogique. La première marque l'apparition de plages blanches centimétriques dans les matériaux à texture de sol et l'acquisition d'un aspect marbré pour l'altérite (réticules rouges bordés d'un liseré jaune). Dans la seconde, les plages blanches plus grosses et plus nombreuses sont anastomosées dans les matériaux à texture de sol et l'altérite sous-jacente, faiblement altérée, est totalement décolorée. La 3ème et 4ème série de différenciations marquent la baisse de la teneur en éléments fins (granulométrie sablo-argileuse puis sableuse) entraînant une accumulation relative de constituants grossiers (essentiellement quartzeux). Ces différenciations se développent aussi bien dans des matériaux à texture de sol que dans des altérites qui conservent les grandes structures de la roche (foliation). La cinquième et dernière série de différenciations marque, à l'inverse, l'accroissement des teneurs en éléments fins et l'apparition (sur échantillons de sol en place et sous lame mince) de macro-cutanes qui colmatent plus ou moins complètement la macroporosité (interstitielle, tubulaire et fissurale). Ces éléments fins sont constitués de kaolinite mais aussi de smectite. Ils donnent aux matériaux un caractère vertique plus ou moins affirmé (coloration gris verdâtre à gris bleuté). Ces accumulations d'argile s'observent à deux niveaux (souvent reliés en continuité) : dans la partie supérieure des altérites à l'emplacement d'anciennes passées plagioclasiques subverticales ; dans les matériaux à texture de sol, en dessous et à l'aval des horizons sableux à sablo-argileux. A l'aval et dans le bas-fond, ces accumulations définissent des structures en langues superposées identiques à celles observées par Boulet (1974) au Burkina Faso. Précisons toutefois que le colmatage du bas-fond n'est vraiment important qu'à l'amont du bassin versant. En surface, il est

révélé par l'éclaircissement ou la disparition de la forêt galerie qui est alors remplacée par une savane herbeuse haute.

Ces différenciations et les résultats des données analytiques montrent qu'il est possible de scinder le système hydromorphe en deux sous-systèmes. Le premier (sous-système à pseudogley et à gley) intègre les deux premières séries de différenciations. A l'amont, il exporte d'une façon ponctuelle le fer (plages blanches du pseudogley). Cette exportation s'accroît ensuite vers l'aval (apparition du gley). Le deuxième sous-système exporte d'abord l'argile à l'amont (3ème et 4ème série de différenciations) puis l'accumule en profondeur et vers l'aval (5ème série de différenciations). Il s'agit du sous-système éluvial-illuvial. Si le premier sous-système est généralisé à l'ensemble des interfluves de l'Afrique de l'ouest, le second a une aire d'extension plus limitée.

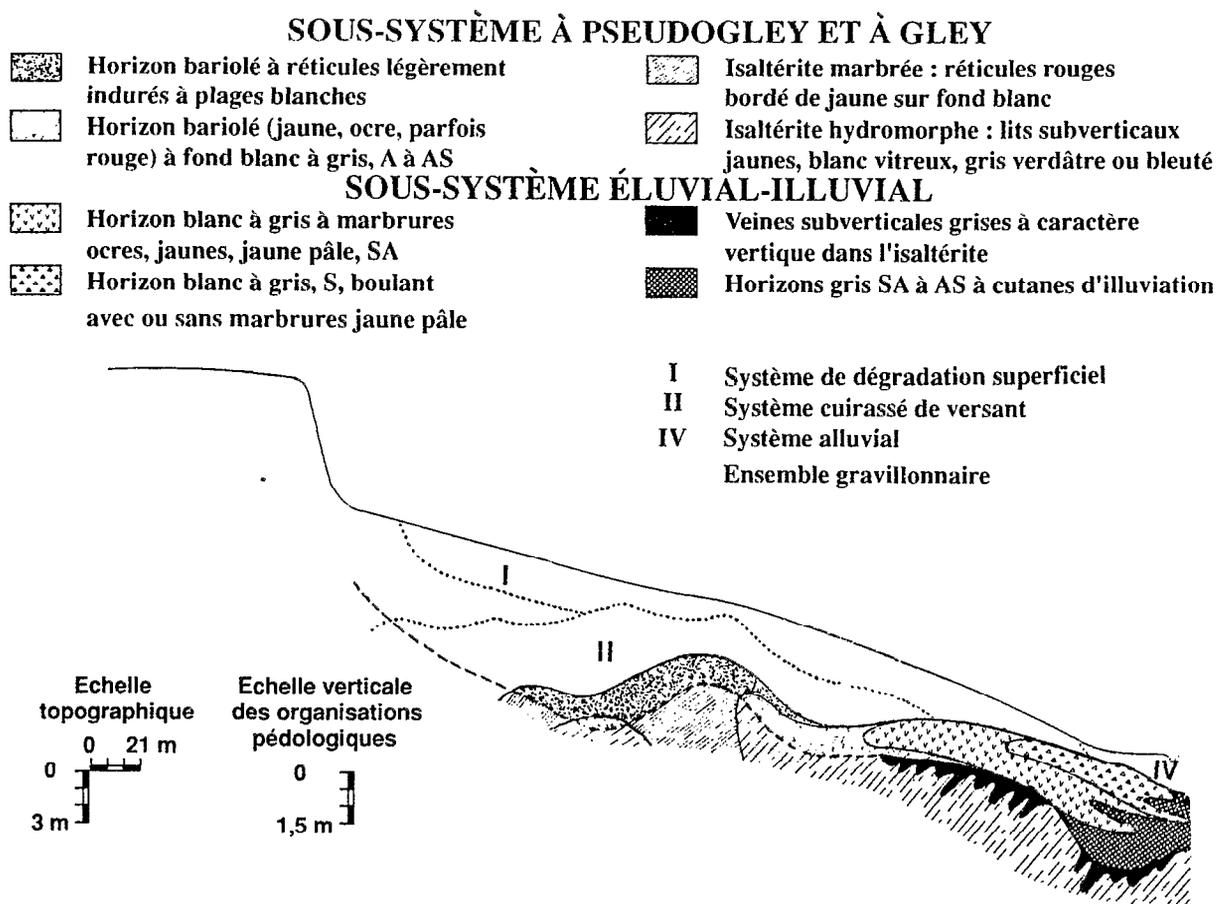


Figure 13. Les altérations et les différenciations du système hydromorphe.

Le système hydromorphe présente certaines analogies avec le système de dégradation superficielle. Comme ce dernier, il exporte d'abord le fer puis l'argile (systèmes soustractifs). De même, le stade ultime de la différenciation aval est identique pour les deux systèmes (horizon blanc sableux). Par contre, le début de la différenciation se fait sous forme de plages pour le premier et d'une façon progressive et continue pour le second. D'autre part, le système hydromorphe est le seul à être à la fois soustractif à l'amont et additif à l'aval (horizons illuviés).

Système superficiel d'apport colluvio-alluvial

Ce système a une aire d'extension limitée. Présent dès la surface du sol, il occupe la partie aval des thalwegs secondaires ainsi que la zone de bas-fond amont du bassin (carte des sols, h.t.). Dans le premier cas, son épaisseur est généralement faible (< 0,5 m). Dans le second cas, son extension verticale devient supérieure au mètre à proximité du marigot. L'extension spatiale du système est limitée à l'aval par un seuil rocheux, situé au centre du bassin dans le lit du marigot. Elle coïncide assez bien en surface avec l'aire d'extension de la savane herbeuse haute du bas-fond.

Les horizons de ce système recouvrent les horizons éluviés et illuviés du système hydromorphe. Ils ont une granulométrie limono-argileuse à argilo-limoneuse et sont pratiquement dépourvus de sables. La teneur en limons fins augmente (de 20 à 35 %) du bas vers le haut dans le bas-fond et de l'aval vers l'amont dans les thalwegs secondaires. Ces constituants fins (argile + limons fins) sont composés de kaolinite et d'une faible proportion de smectite (5 à 10 %). Les smectites donnent aux horizons un léger caractère vertique. Ces derniers sont constitués d'horizons humifères noirs (LA) à nombreux débris végétaux, très bien agrégés (grumeleux, polyédrique à faces engrenées) et à forte activité biologique (surtout lombrics) et parfois d'horizons minéraux gris brunâtre à structure prismatique puis massive en profondeur (gley AL).

LES ORGANISATIONS PEDOLOGIQUES SUPERFICIELLES

Les unités de la carte des réorganisations superficielles

A l'échelle du bassin, le document cartographique (carte des réorganisations superficielles, h.t.) différencie les surfaces selon les critères les plus marquants en termes d'organisation structurale de la surface du sol et de son fonctionnement hydrodynamique. Les critères retenus pour la délimitation de ces surfaces sont les suivants :

- le type de croûte. La typologie utilisée est celle proposée par Casenave et Valentin (1989). Elle repose sur la granulométrie, le nombre et l'épaisseur des microhorizons qui constituent la croûte,
- la litière caractérisée à la fois par son épaisseur et par son extension spatiale. Le plus souvent, elle est associée à un chevelu racinaire et à une forte activité des termites *Macrotermes*,
- le micro-relief. Il correspond à une élévation des microbuttes herbacées sous l'effet de l'activité des vers et à des incisions induites par le ruissellement concentré. Il se définit à la fois par son amplitude et par son organisation (anisotrope, ou, à l'inverse, perpendiculaire ou parallèle au sens de la pente),

- l'hydromorphie superficielle, soulignée par la présence, dès la surface, de taches d'oxydo-réduction,
- la pente.

Ces critères ont permis de distinguer 12 unités cartographiques qui peuvent être regroupées en trois grands ensembles selon :

- la présence ou non d'un encroûtement superficiel,
- son caractère saisonnier ou permanent.

Les grands traits de la distribution des réorganisations superficielles

Le document cartographique met en évidence :

- une apparition de l'encroûtement saisonnier en haut de versant qui devient permanent de part et d'autre de la rupture de pente de mi-versant,
- une disparition des croûtes à l'aval des versants.

Ce schéma général correspond assez bien à celui de la distribution des sols. A cet égard, la cartographie détaillée des réorganisations superficielles dans l'un des thalwegs secondaires (site équipé de matériel tensio-neutronique) met en évidence une distribution emboîtée de l'encroûtement superficiel (fig. 14) : le fort encroûtement caractérisé par des croûtes d'érosion et un micro-relief en marches d'escalier emboîte une zone où les croûtes structurales expriment un plus faible degré de réorganisations superficielles tandis qu'au centre de la dépression et à l'aval, la surface du sol se trouve dépourvue de pellicules. Enfin, notons la présence d'une incision à la mi-versant. Celle-ci, très marquée au niveau des surfaces fortement encroûtées, disparaît dès qu'elle rejoint la zone à surface sableuse non encroûtée.

INTERACTIONS ENTRE CERTAINES COMPOSANTES DU MILIEU PHYSIQUE

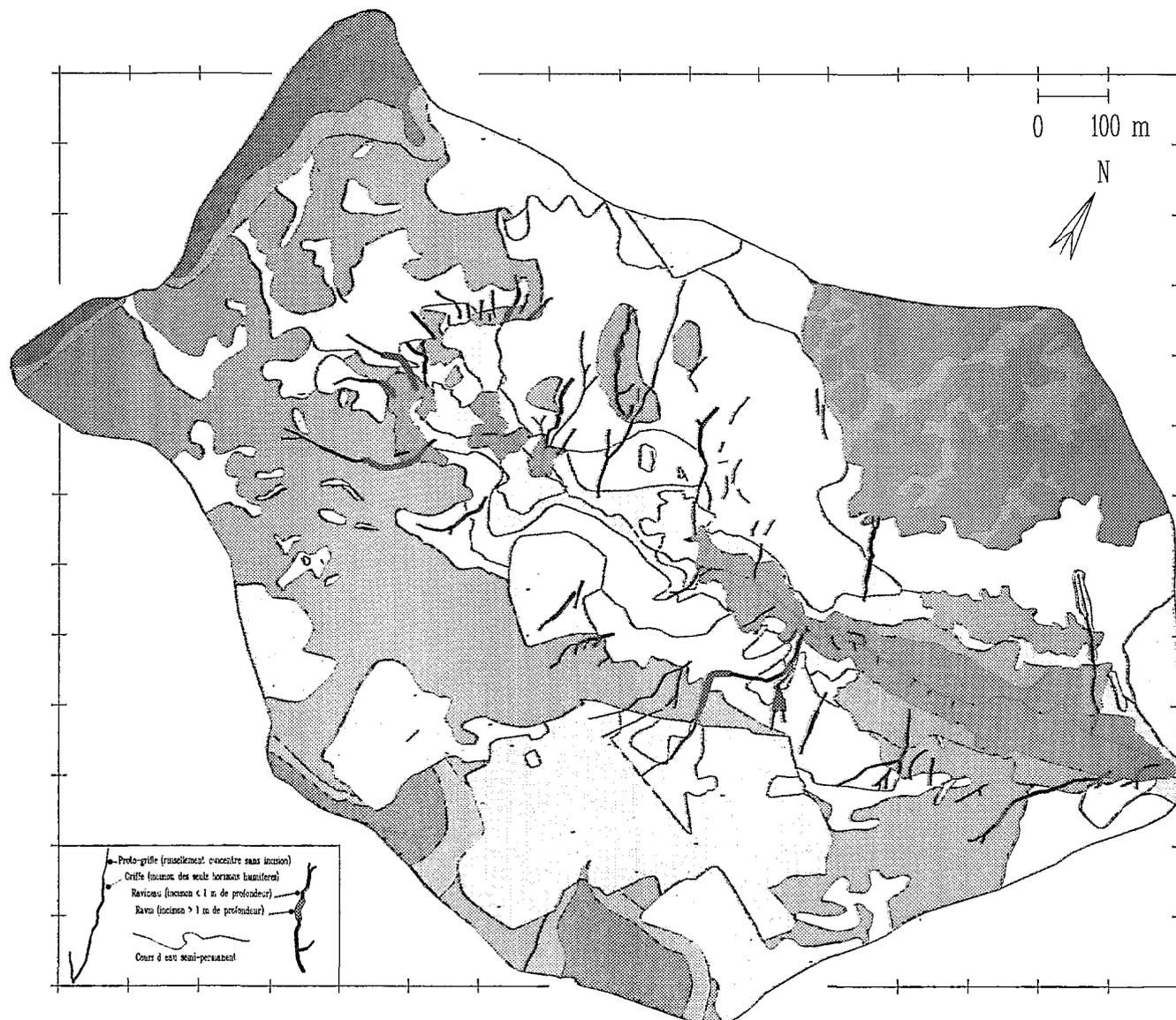
La lithodépendance et la dynamique évolutive des systèmes

Les résultats de l'étude font ressortir une altération différentielle du substratum rocheux qui canalise et oriente le développement des grands ensembles pédologiques (ou systèmes) du bassin versant.

L'altération différentielle du substratum rocheux est révélée à la fois par les ondulations du socle qui semblent avoir, sur le bassin, une périodicité de 200 m et par une plus ou moins grande hydrolyse des minéraux primaires dans la zone d'altération, mais aussi (à l'aval des versants) dans la couverture de sol qui la surmonte.

Dans le premier cas, l'altération différentielle dépend d'une part de la nature des minéraux primaires (*cf* échelle d'altérabilité des minéraux endogènes ; Goldich, 1938) : les plagioclases et les minéraux ferro-magnésiens sont les plus facilement altérables ; les micas blancs (séricite) et les quartz, à l'inverse, les plus difficilement altérables ; et d'autre part de la texture (taille et mode d'assemblage) et de la structure (foliation, diaclase, fissuration) de la roche. Ainsi, l'altération différentielle est reliée :

- dans les zones de surcreusement du socle, à des fissurations même faibles et /ou à des passées essentiellement plagioclasiques dans les gneiss,



Encrustement permanent :
naturel : anthropique

surface d'érosion
 surface structurale

Encrustement saisonnier :
naturel anthropique

Sans encrustement :

	Litière	MicroRelief	Hydromorphie	Pente
	local	faible ou nul	local	faible ou nul
	local	faible ou nul	faible ou nul	fort
	local	faible ou nul	faible ou nul	faible ou nul
	faible ou nul	faible ou nul	local	faible ou nul
	fort	faible ou nul	faible ou nul	faible ou nul
	fort	faible ou nul	moyen	local
	moyen	fort	fort	faible ou nul

les reorganisations superficielles

- dans les zones de bombement du socle, à des faciès plus quartzeux ou à des lentilles de pyroxéno-amphibolites à grains fins moins sensibles à l'altération car plus compacts.

Dans le deuxième cas, l'hydrolyse plus ou moins poussée des minéraux primaires permet de distinguer des ensembles meubles (altérite et sol) à forte teneur en minéraux primaires facilement altérables et des ensembles qui en sont dépourvus (à l'exclusion des quartz et des minéraux lourds). Si les seconds sont peu épais et localisés à grande profondeur à l'amont des versants, ils deviennent, à l'inverse, beaucoup plus épais et subaffleureants à l'aval de ces versants. Ainsi, ces variations latérales ont révélé des états d'altération différents entre la partie amont et aval des versants.

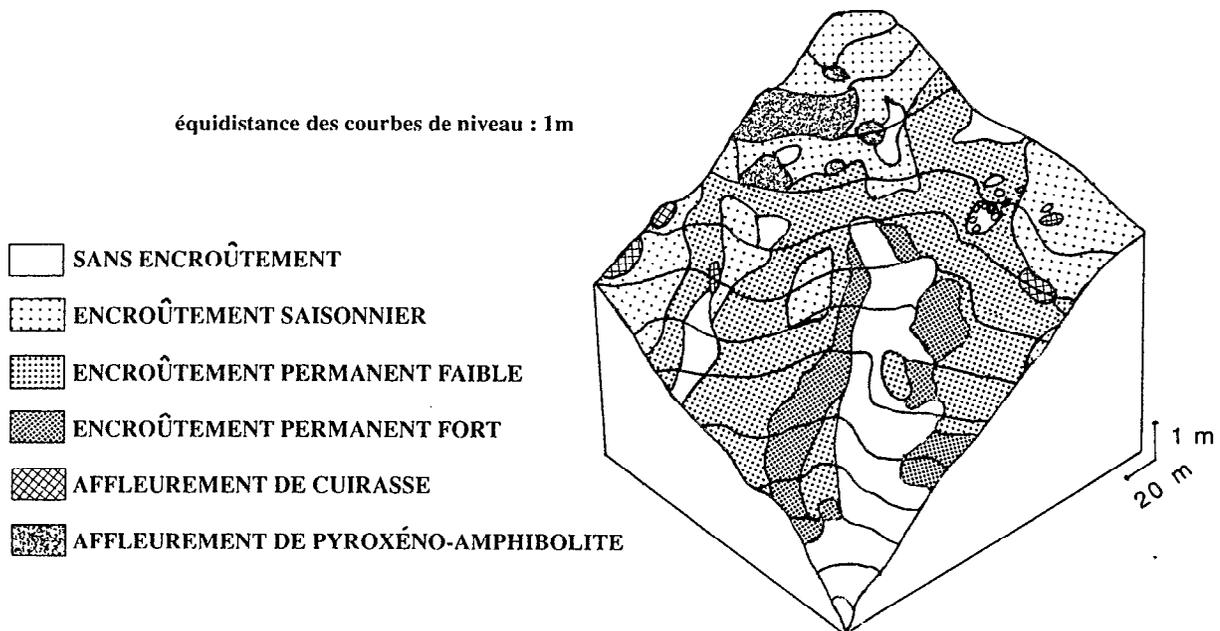


Figure 14. Distribution des organisations superficielles à l'échelle d'un thalweg secondaire.

Cette altération différentielle canalise et oriente le développement des systèmes pédologiques. Toutefois, cette lithodépendance est d'autant moins nette qu'on se rapproche de la surface topographique. Ainsi, le système hydromorphe aval (le plus profond) se développe dans les versants à partir du bas-fond. Il présente un développement vertical accru dans les thalwegs secondaires. Ces thalwegs sont tous orientés perpendiculaires à l'axe du marigot et coïncident avec des zones de surcreusement du socle. Les systèmes cuirassés (du plateau et de la mi-versant), plus proches de la surface topographique, se développent, à l'inverse, dans les zones de

bombement du socle dont nous avons vu qu'elles pouvaient être plus riches au départ en fer. Ces systèmes coiffent le manteau d'altération qu'ils imperméabilisent en accumulant le fer. Enfin, le système de dégradation superficielle qui assure le passage des sols rouges à l'amont aux sols ocres, jaunes puis blanc vers l'aval exporte les constituants fins du sol (oxydes de fer puis kaolinite). Il a très probablement exploité, à son début, les parties les moins altérées de la couverture pédologique (les moins riches, au départ, en constituants fins), c'est-à-dire la partie aval des versants.

Les évolutions géochimiques : conséquence sur la morphogénèse

D'un point de vue géochimique, les principaux systèmes inventoriés sur le bassin versant peuvent être classés dans deux grandes familles. Les premiers sont essentiellement additifs, il s'agit des systèmes cuirassés qui accumulent d'une façon relative mais aussi de façon absolue le fer. Les seconds sont essentiellement soustractifs, il s'agit du système de dégradation superficielle et du système hydromorphe qui exportent d'abord le fer puis l'argile. Nous avons vu que le sous-système éluvia-illuvial du système hydromorphe était soustractif à l'amont et additif à l'aval. Toutefois, comme en témoignent les exportations de matière dans les eaux du marigot, le système hydromorphe reste globalement soustractif.

Les systèmes cuirassés, par imperméabilisation progressive, arment le paysage à deux niveaux : sur les plateaux et à la rupture de pente de mi-versant. Ces indurations sont fortement lithodépendantes dans la mesure où elles coïncident avec des compartiments (socle + altérite) plus compacts, plus riches au départ en fer, plus difficilement altérables et, de ce fait, plus proches de la surface du sol. Cette lithodépendance pose ainsi le problème de l'homogénéité de la couverture pédologique avant le développement des systèmes. En réalité, cette homogénéité n'a probablement jamais existé et les systèmes n'ont fait qu'exploiter, à l'inverse, une hétérogénéité due à l'altération différentielle du substratum rocheux.

Les deux autres systèmes entraînent une érosion interne à la couverture pédologique d'autant plus importante que les évolutions minéralogiques et structurales sont plus poussées. Il s'ensuit à la fois un affaissement de la surface topographique et la mise en relief des niveaux cuirassés. Le système de dégradation superficielle, en se développant vers l'aval, pourrait ainsi être à l'origine du glacis versant (pente douce et régulière d'environ 2 %). De même, le développement vertical des horizons éluviés du système hydromorphe est lui-même à l'origine de la rupture de pente de mi-versant et des thalwegs secondaires (Fritsch *et al.*, 1986b). En accentuant la déclivité des versants (entre autres, à l'aval de la rupture de pente de mi-versant), ces systèmes permettent le développement d'une érosion mécanique à la surface du sol (Planchon *et al.*, 1987).

Ainsi, le bassin versant de Booro-Borotou montre très nettement que l'érosion interne précède l'érosion mécanique superficielle et que ces deux formes d'érosion jouent un rôle prédominant dans le façonnement du modelé.

La dégradation de la partie supérieure de la couverture pédologique : relation entre deux types de dégradation l'une superficielle, l'autre sub-superficielle

Dans la partie supérieure de la couverture pédologique, les formes de dégradation se manifestent à deux niveaux de profondeur. D'abord en surface, elles correspondent

alors aux réorganisations superficielles (Valentin, 1981). Puis plus en profondeur (sur 1 m en moyenne), il s'agit du système de dégradation superficielle qui marque le passage des sols rouges aux sols ocres, jaunes puis blancs. Ce système affecte d'abord les horizons humifères (0-35 cm) lorsqu'il est peu développé puis les horizons minéraux quand son développement vertical devient plus important.

A l'échelle du bassin versant, il existe une assez bonne concordance entre ces deux formes de dégradation. Ainsi, l'apparition puis le développement des réorganisations de surface à la mi-versant (avec ou sans manifestation d'érosion) peuvent être reliés à l'apparition et au développement du système de dégradation superficielle. A plus petite échelle, ceci nous permet de relier les sols ferrugineux aux zones à fortes réorganisations de surface et les sols ferrallitiques aux sols dépourvus de telles réorganisations.

A plus grande échelle, cette concordance générale souffre toutefois de nombreuses exceptions. Il convient alors de prendre en considération la nature et la structure du couvert végétal qui contrôle en grande partie l'encroûtement (Casenave et Valentin, 1989). Ainsi, la présence d'un couvert végétal sur des sols "dégradés" et donc d'une litière au sol peut freiner, voire même faire disparaître les réorganisations de surface. A l'inverse, l'absence de couvert sur des sol "non dégradés" (cas d'une mise en culture ou de formes particulières en couloir à l'amont des versants) peut entraîner un début de réorganisation en surface. Cette dernière peut d'ailleurs avec le temps être considérée comme un précurseur d'une dégradation plus profonde et irréversible (Chauvel, 1977). De ce fait, dans un écosystème dont l'équilibre est perturbé par l'activité anthropique (mise en culture, abandon de la culture et installation de jachères, feux de brousse...), les relations entre les deux formes de dégradation ne seront plus aussi strictes (cas du bassin de Booro-Borotou).

Enfin, la disparition des réorganisations de surface à l'aval des versants doit être reliée à l'apparition d'horizons humifères nettement sableux qui favorise à nouveau l'infiltration. Ces horizons sont à la fois apparentés au système de dégradation superficielle et à la "langue" éluviale du système hydromorphe qui affleure à la surface du sol en bas de versant.

CONCLUSION

La caractérisation du bassin versant de Booro-Borotou nous permet de regrouper les différentes composantes du milieu physique dans deux grands groupes :

- roches, formations cuirassées, réseau hydrographique,
- climat, sols, réorganisations superficielles, végétation.

Les composantes du premier groupe font ressortir les directions structurales majeures de la région. Ces directions sont révélées par deux types d'orientations (60° et 160°) affectant les formations cuirassées et le réseau hydrographique. Ces orientations concordent avec les deux directions lithologiques profondes (direction de foliation des gneiss dans le premier cas, de fracturation dans le second cas).

Les composantes du second groupe présentent des variations spatiales ordonnées globalement suivant deux gradients :

- un gradient toposéquentiel à l'échelle du bassin versant,
- un gradient latitudinal à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest.

A l'échelle du bassin versant de Booro-Borotou, nous avons montré l'articulation entre deux grands domaines : un domaine ferrallitique amont, un domaine ferrugineux aval. A l'échelle de l'Afrique de l'Ouest, ces deux domaines se retrouvent respectivement au sud et au nord du bassin. En effet, le bassin est situé à la transition entre, d'une part, les paysages forestiers à climat équatorial humide et pluvieux du domaine ferrallitique au sud et, d'autre part, les paysages de savane à climat tropical sec et contrasté du domaine ferrugineux au nord.

Ceci souligne la très grande représentativité des organisations inventoriées puisqu'elles s'apparentent à ces deux grands domaines, mais également leur extrême diversité et complexité de par leur nombre et leur type de distribution relative.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Boa (D.)**, 1989. Caractérisation, propriétés hydrodynamiques, contraintes et potentialités des sols gravillonnaires : cas de Booro-Borotou (région de Touba, nord-ouest de la Côte d'Ivoire). *Thèse de 3ème cycle*, Université d'Abidjan.
- Bonhomme (M.)**, 1962. Contribution à l'étude géochronologique de la plateforme de l'ouest africain. *Thèse*, Univ. Clermont Ferrand. Ann. Fac. Sci. Univ. Clermont Ferrand, *Géol. Minéral.*, n°5, 62 p.
- Boulet (R.)**, 1974. Toposéquences de sols tropicaux en Haute-Volta. Equilibres dynamiques et bioclimatiques. *Thèse Sci.* Strasbourg, *Mém. ORSTOM*, 85, 272 p.
- Boulet (R.)**, **Humbel (F.X.)**, **Lucas (Y.)**, 1982. Analyse structurale et cartographie en pédologie. II : Une méthode d'analyse prenant en compte l'organisation tridimensionnelle des couvertures pédologiques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 9 (1) : 323-339.
- Casenave (A.)**, **Valentin (C.)**, 1989. Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. ORSTOM, Paris, *sér. Didactiques*, 230 p. + annexes.
- Chauvel (A.)**, 1977. Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. Evolution et réorganisation des sols rouges en Moyenne Casamance. *Thèse Sci.* Strasbourg, ORSTOM, *Travaux et Documents*, n°62, 532 p.
- Eschenbrenner (V.)**, 1969. Etude géomorphologique et pédologique de la région de Tanda (Côte d'Ivoire). ORSTOM, Adiopodoumé, multigr., 83 p.
- Eschenbrenner (V.)**, **Badarello (L.)**, 1978. Etude pédologique de la région d'Odienné (Côte d'Ivoire). Carte des paysages morphopédologiques. Feuille Odienné à 1/200.000. Notice explicative n°74, 123 p., ORSTOM, Paris.
- Eschenbrenner (V.)**, **Grandin (G.)**, 1970. La séquence de cuirasses et ses différenciations entre Agnibélékrou (Côte d'Ivoire) et Diébougou (Haute-Volta). *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, vol. 11, n° 2, 205-245.
- Fritsch (E.)**, **Bocquier (G.)**, **Boulet (R.)**, **Dosso (M.)**, **Humbel (F.-X.)**, 1986a. Les systèmes transformants d'une couverture ferrallitique de Guyane française. Analyse structurale d'une formation supergène et mode de représentation. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 12 (4) : 361-395.
- Fritsch (E.)**, **Planchon (O.)**, **Boa (D.)**, 1986b. Les transformations d'un paysage cuirassé au nord-ouest de la Côte d'Ivoire sur formations gneissomigmatitique. in : Séminaire Régional sur les latérites. ORSTOM, *Coll. Colloques et Séminaires*, 12 p., 11 fig.
- Fritsch (E.)**, **Herbillon (A.)**, **Jeanroy (E.)**, **Pillon (P.)**, **Barres (O.)**, 1989. Variations minéralogiques et structurales accompagnant le passage "sols rouges-sols jaunes" dans un bassin versant caractéristique de la zone de contact forêt-savane de l'Afrique occidentale (Booro-Borotou, Côte d'Ivoire). *Sci. Géol. Bulletin*, à paraître.
- Goldich (S.S.)**, 1938. A study in rock weathering. *J. Geol.*, 46 : 17-23.

Iris (J.M.), 1986. Analyse et interprétation de la variabilité spatiale de la densité apparente dans trois matériaux ferrallitiques. *Science du Sol*, 3 (24), 245-256.

Planchon (O.), **Fritsch (E.)**, **Valentin (C.)**, 1987. Rill development in a wet savannah environment. *Catena suppl.* 8 : 55-70.

Valentin (C.), 1981. Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région sub-désertique (Agadez - Rép. du Niger). Dynamique de formation et conséquences sur l'économie en eau. *Thèse 3^{ème} cycle*, Univ. Paris VII. *ORSTOM, Etudes et Thèses*, 1985, 229 p.